

# 평균응력이 AZ31 마그네슘합금의 랜덤진전균열크기 확률분포에 미치는 영향

최선순\*, 이억섭<sup>+</sup>

(논문접수일 2009. 8. 20, 심사완료일 2009. 9. 29)

## Effect of Mean Stress on Probability Distribution of Random Grown Crack size in Magnesium Alloy AZ31

Seon Soon CHOI\*, Ouk Sub LEE<sup>+</sup>

### Abstract

In this paper the mean stress effects on the probability distribution of the random grown crack size at a specified loading cycle are studied through the fatigue crack propagation tests, which are conducted on the specimens of magnesium alloy under four different stress ratios. Through 80 replicates the probability distributions of the grown crack size are obtained. The goodness-of-fit for probability distributions of the random grown crack size are investigated by Anderson-Darling test and the best fit for those probability distributions is found to be a 3-parameter Weibull distribution. The effects of the mean stress on the probability distribution of the random grown crack size are also estimated.

**Key Words** : Mean stress(평균응력), Magnesium alloy(마그네슘합금), Fatigue crack propagation(피로균열진전), Probability distribution(확률분포)

## 1. 서론

기계나 구조물에서 고성능 추구와 에너지절감을 위한 구조재로서의 마그네슘합금은 매우 매력적인 재료이다. 왜냐하면 마그네슘합금은 경량성과 우수한 비강도와 비강성, 그리고 양호한 가공성과 리사이클성의 우수함 등의 장점을

가지고 있기 때문이다. 일반적으로 마그네슘합금은 두 가지 범주, 즉 단련용 합금과 주조용 합금으로 분류되고 있다. 주조용 합금은 단련용 합금에 비하여 제조 유연성과 저비용과 같은 장점을 가지고 있어서 최근에 자동차산업에서 활용도가 높아지고 있다. 반면에 단련용 합금은 주조용 합금보다 기계적 특성이 매우 우수하기 때문에 하중을 지지하는 곳에

\* 삼육대학교 카메카트로닉스학과 (choiss@syu.ac.kr)  
주소: 139-742 서울시 노원구 공릉2동 26-21

+ 인하대학교 기계공학부

활용될 수 있다. 단련용 합금은 사용 중에 발생할 수 있는 피로현상이 증대한 고려사항이므로 단련용 마그네슘합금의 피로특성을 평가하는 것이 매우 필수적이다<sup>(1)</sup>. 최근 마그네슘합금의 피로특성에 대한 연구가 진행되고 있지만 마그네슘합금의 피로균열진전거동에 관한 보고는 매우 적은 편이다<sup>(2-4)</sup>.

구조재에 작용하는 하중이나 재료의 불균질성 그리고 사용환경의 변동성 등으로 인하여 구조재의 피로균열진전 거동은 확률론적인 특성을 나타내고 있다. 이러한 특성은 마그네슘합금이 적용되고 있는 구조재에서도 동일한 문제로 대두되고 있지만 마그네슘합금의 피로균열진전 거동에 대한 확률론적인 평가는 매우 드물게 보고되고 있다<sup>(5-9)</sup>.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 평균응력 조건에 대하여 피로균열진전 실험을 수행 하였으며, 실험을 통하여 얻은 피로균열의 통계적인 데이터를 이용하여 평균응력이 피로균열의 통계적 특성에 미치는 효과를 고찰하였다. 또한 피로균열의 확률분포를 각 평균응력 조건 별로 그리고 피로균열진전 과정 별로 평가하여 마그네슘합금에 적합한 확률분포를 제시하였으며, 평균응력이 피로균열의 확률분포에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료 및 시편

피로균열진전실험에 사용된 재료는 상용 마그네슘합금 AZ31이며 재료의 화학적 성분조성은 Table 1과 같으며 기계적 성질은 Table 2와 같다.

피로균열진전실험에 사용된 시편은 ASTM E647-00<sup>(10)</sup>규격에 따라 폭(W)이 50.8mm이고 두께(B)가 6.60mm인 CT(Compact Tension)형으로 제작하였으며, 피로균열진전

**Table 1 Chemical composition of magnesium alloy AZ31 (wt, %)**

Al	Zn	Si	Mn	Cu	Fe	Mg
3.29	0.95	0.04	0.31	0.003	0.01	Bal.

**Table 2 Mechanical properties of magnesium alloy AZ31**

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
198.3	264.4	21.95

거동에 영향을 미치는 기계가공 잔류응력을 피하기 위하여 모재로부터 직접 채취하여 L-T방향으로 와이어 방전가공하여 준비하였다.

### 2.2 피로균열진전실험

CT시편을 이용하여 상온의 대기 중에서 ASTM E647-00 규격에 따라 피로균열진전실험을 수행하였으며, 실험장치는 100kN 용량의 유압 서보식 피로시험기로서 마이크로컴퓨터를 이용하여 주파수 10Hz의 sine파형으로 일정진폭하중 제어가 되도록 구성하였다. 피로시험의 최대하중은 2.00kN으로 제어하였다.

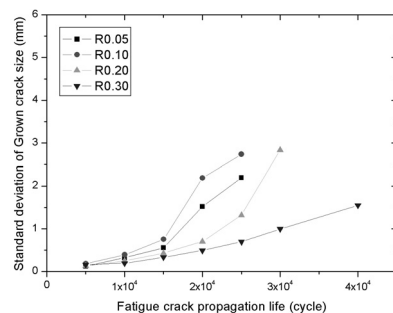
CT시편 노치부의 기계가공효과를 제거하고 예리한 균열 선단을 만들기 위하여 예비균열길이를 3.0mm로 정하여 피로시험을 실시하였으며, 균열이 노치선단으로부터 3.0mm가 진전되었을 때부터 사이클수와 균열길이를 컴퓨터로 자동 계산하여 저장하였다. 균열길이는 클립게이지를 이용하여 하중작용선상의 균열열림길이를 측정하여 컴플라이언스 기법으로 계산하였다.

평균응력의 영향을 고찰하기 위하여 응력비(R)를 4가지 즉, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30의 경우에 대하여 실험하였으며, 피로균열의 확률분포를 결정하기 위하여 4가지 응력비에 대한 시편을 각각 20개씩 준비하여 피로균열진전실험을 수행함으로써 특정한 수명에서의 진전균열크기의 통계적 데이터를 확보하였다.

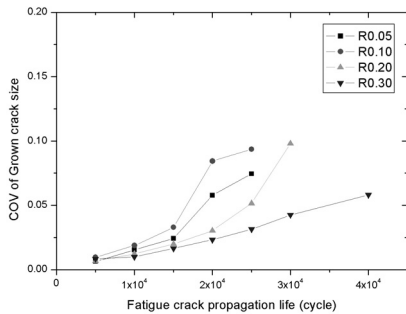
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 피로균열의 통계치의 변동성

4가지의 응력비 조건으로 일정진폭 피로균열진전실험을



**Fig. 1 Standard deviation of grown crack size at a specific fatigue crack propagation life<sup>(7)</sup>.**



**Fig. 2 Coefficient of variation(COV) of grown crack size at a specific fatigue crack propagation life<sup>(7)</sup>.**

수행한 결과 각 조건에서 피로균열에 산포가 발생하였으며, 동일한 응력비에서도 피로균열의 변동성이 나타났다. 평균 응력 조건의 변화에 따른 특정수명에서의 피로균열에 대한 산포를 고찰하기 위하여 표준편차와 변동계수(이하 COV라고 표기함)를 Fig. 1~Fig. 2에 나타내었다.

### 3.1.1 피로균열의 표준편차의 변동

Fig. 1은 피로균열진전(이하 FCP라고 표기함)이 5,000, 10,000, 15,000, 20,000, 25,000, 30,000, 40,000 사이클 될 때 피로균열의 표준편차를 각 응력비조건 별로 도시한 것이며, 피로실험을 통하여 얻은 피로균열 데이터에 기술통계기법을 적용하였다.

일반적으로 균열 초기에는 각 조건 별로 표준편차가 작고 변동도 크지 않았으며 균열이 진전함에 따라 표준편차 크기가 증가하면서 변동성도 커지는 경향을 보였다. 특히 파단에 가까울수록 피로균열의 표준편차가 급증하였는데 이는 균열 초기에는 균열이 안정적인 성장을 보이다가 파단에 가까울수록 불안정적인 성장을 보이기 때문인 것으로 사료된다.

응력비가 작은 0.05와 0.10의 경우 15,000사이클 부근에서부터, 0.20인 경우에는 20,000사이클 부근에서부터 급격히 표준편차가 커지는 경향을 보인 반면에 응력비가 0.30인 경우는 전 균열진전 영역에 걸쳐 표준편차의 증가추세가 완만하였다. 전체적으로 응력비가 클수록, 즉 평균응력이 클수록 피로균열의 표준편차가 작아졌는데 이는 응력비가 클수록 하중진폭이 작아서 균열이 안정적으로 성장하기 때문일 것으로 사료된다.

### 3.1.2 피로균열의 COV의 변동

3.1.1절의 표준편차와 같은 피로실험 조건에서 얻은 피로

균열의 COV를 Fig. 2에 각 응력비 별로 나타내었다.

피로균열의 평균효과가 고려되었음에도 불구하고 피로균열의 표준편차 경향과 마찬가지로 균열초기에는 각 응력비 조건 별로 COV가 작고 변동도 크지 않았으며 균열이 진전될수록 COV가 증가하면서 변동성도 커지는 경향을 보였다. 특히 파단에 가까울수록 피로균열의 COV도 급증하였다.

응력비가 작은 0.05와 0.10의 경우 15,000사이클 부근에서부터, 0.20인 경우에는 20,000사이클 부근에서부터 표준편차의 경우와 마찬가지로 급격히 COV가 커지는 경향을 보인 반면에 응력비가 0.30인 경우는 전 균열진전 영역에 걸쳐 COV의 증가추세가 완만하였다. 전체적으로 응력비가 클수록, 즉 평균응력이 클수록 피로균열의 COV가 작아졌는데 이는 응력비가 클수록 하중진폭이 작아서 균열이 안정적으로 성장하는 것으로 사료된다.

## 3.2 평균응력 변화에 따른 피로균열의 확률분포 적합성 평가

피로균열의 표준편차와 COV의 변동성이 피로균열진전 과정에서 발생하였다. 이러한 피로데이터의 산포에 적합한 확률분포를 규명하기 위하여 일반적으로 많이 사용하고 있는 4가지 확률분포, 즉 정규분포, 로그정규분포, Weibull분포, 3-파라미터 Weibull분포에 대하여 분포적합성 검정을 실시하였다. 피로균열 데이터의 통계적 처리를 위하여 상용 통계해석 프로그램인 MINITAB R15를 이용하여 5% 유의수준에서 분석하였다.

피로균열 데이터가 어느 확률분포에 적합한지를 검증하는 방법으로 Kolmogorov-Smirnov 검정법(이하 K-S 검정법이라고 표기함)을 보통 사용하고 있으나 본 연구에서는 K-S 검정법을 민감성이 더 우수하도록 수정하여 개발된 Anderson-Darling 검정법(이하 A-D 검정법이라고 표기함)을 채택하여 검증하였다. A-D 검정법은 통계 데이터에 대한 검정 통계치  $A^2$ 으로 확률분포의 적합성을 검증하며, 통계치  $A^2$ 은 Eq. (1)로 구한다.

$$A^2 = -n - S \tag{1}$$

$$S = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(2i-1)}{n} \{ \ln(F(x_i)) + \ln(1 - F(x_{n+1-i})) \} \right]$$

여기서  $F()$ 는 검정 대상 확률분포의 누적분포함수이며  $n$ 은 실험관측개수이다. 그리고  $x_i$ 는 정렬된 데이터이다.

통계 데이터의 누적분포함수를 Eq. (1)에 대입하여 구한 검정 통계치  $A^2$ 이 확률분포의 임계치보다 작을 경우 데이

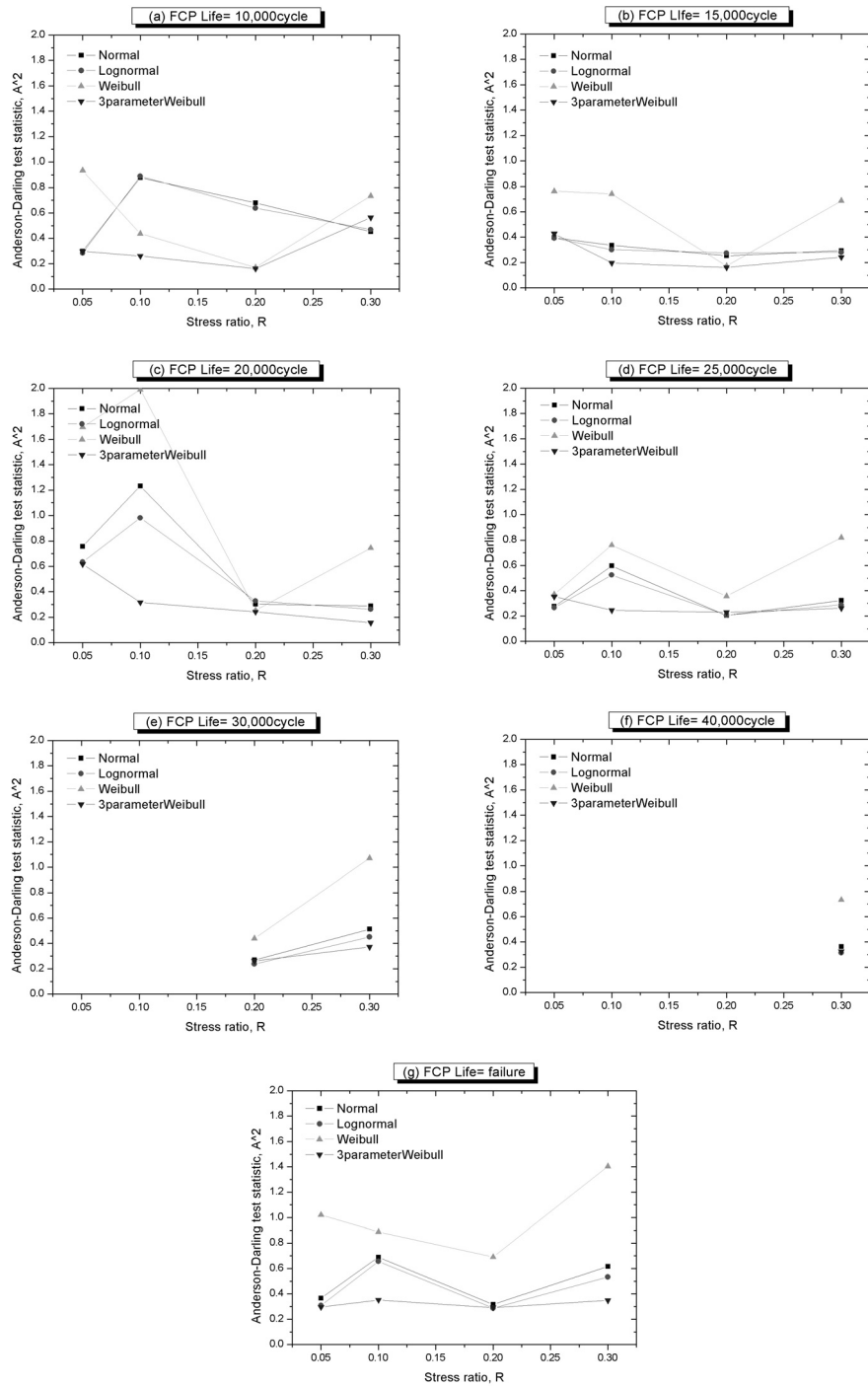


Fig. 3 Anderson-Darling goodness-of fit test statistics of probability distribution of grown crack size<sup>(7)</sup>.

터는 그 확률분포에 적합하다고 판단한다. Weibull분포의 경우 임계치는 5% 유의수준에서 0.744이다<sup>(11)</sup>. 확률분포 간에 분포 적합성을 비교할 때 각 확률분포의 검정 통계치  $A^2$  이 더 작을수록 통계 데이터가 그 확률분포에 더 적합하다고 판단할 수 있다.

Fig. 3은 4가지 응력비 0.05, 0.10, 0.20, 0.30 조건에 대한 피로균열 데이터의 A-D 검정 통계치를 각 피로균열진전 단계에서 표시한 것으로서, 피로균열진전실험에서 확보한 피로균열 통계 데이터의 특정 확률분포에 대한 누적분포함수를 먼저 구하고 이 값을 Eq. (1)에 대입하여 얻은 검정 통계치  $A^2$ 을 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)은 10,000사이클이 진행되었을 때의 피로균열 데이터를 정규분포, 로그정규분포, Weibull분포, 그리고 3-파라미터 Weibull분포에 대하여 A-D 검정을 실시한 결과이다. 응력비가 0.05와 0.30인 경우 Weibull분포를 제외한 정규분포, 로그정규분포, 그리고 3-파라미터 Weibull분포가 분포적합성을 보였으며 응력비 0.10과 0.20인 경우에는 Weibull분포와 3-파라미터 Weibull분포가 분포 적합성을 보였다. 모든 응력비 조건에서 가장 우수한 분포적합성을 보인 것은 3-파라미터 Weibull분포였다.

15,000사이클이 진행되었을 때의 피로균열 데이터의 확률분포 적합성은 Fig. 3(b)에 나타내었는데 응력비가 0.05, 0.10, 0.30의 경우 Weibull분포를 제외한 정규분포, 로그정규분포, 3-파라미터 Weibull분포가 분포적합성을 보인 반면 응력비 0.20의 경우에는 4가지 확률분포 모두가 분포적합성을 나타내었다. 모든 응력비 조건에서 양호한 분포적합성을 보인 확률분포는 정규분포, 로그정규분포, 3-파라미터 Weibull 분포이며 그중에서 가장 우수한 적합성을 보인 것은 10,000사이클의 경우와 같이 3-파라미터 Weibull분포였다.

Fig. 3(c)는 20,000사이클이 되었을 때의 피로균열 데이터의 확률분포 적합성을 나타내고 있는데 응력비가 0.05의 경우 로그정규분포와 3-파라미터 Weibull분포가 분포적합성을 보였으며, 0.30의 경우에는 정규분포, 로그정규분포, 그리고 3-파라미터 Weibull분포가 적합성을 나타내었다. 그러나 응력비 0.10의 경우는 3-파라미터 Weibull분포만 적합성을 보였으며 0.20의 경우에는 4가지 확률분포 모두가 분포적합성을 나타내었다. 10,000과 15,000사이클의 경우와 같이 20,000사이클에서도 모든 응력비 조건에서 가장 우수한 분포적합성을 보인 확률분포는 3-파라미터 Weibull분포로 나타났다.

FCP사이클이 25,000이 되었을 때의 진전균열에 대한 A-D 검정 통계치를 Fig. 3(d)에 나타내었는데 응력비 0.10과 0.30

의 경우는 정규분포, 로그정규분포, 그리고 3-파라미터 Weibull 분포가 적합하였으며 반면에 0.05와 0.20의 응력비 조건에서는 4가지 확률분포 모두 분포적합성을 보였다. 이 경우에도 모든 응력비 조건에서 볼 때 3-파라미터 Weibull분포가 우수한 적합성을 나타내었다.

Fig. 3(e)는 응력비 0.20과 0.30인 경우의 피로균열 데이터만 A-D 검정 통계치를 나타내고 있는데 이것은 응력비 0.05와 0.10의 경우에는 이미 피로파손이 발생하였기 때문에 피로균열 데이터가 없음을 의미하고 있다. 응력비 0.30의 경우 정규분포, 로그정규분포, 그리고 3-파라미터 Weibull 분포가 분포적합성을 보인 반면 0.20의 경우에는 15,000, 20,000, 25,000사이클의 경우처럼 4가지 확률분포 모두에서 분포적합성을 나타내었다.

응력비 0.30인 경우 Fig. 3(f)에서 볼 수 있듯이 다른 응력비 조건에 비해 피로수명이 가장 길다는 것을 알 수 있다. FCP사이클 25,000과 30,000, 40,000과 비교해 볼 때 응력비가 클수록, 즉 평균응력이 클수록 피로수명이 길다는 것을 확인할 수 있었다. 40,000사이클에서 분포적합성은 Weibull 분포를 제외한 정규분포, 로그정규분포, 그리고 3-파라미터 Weibull 분포가 양호한 적합성을 보였다.

피로균열진전과정을 종합해 볼 때 응력비 0.05의 경우 Weibull 분포가 일부 구간에서 분포적합성을 보인 반면 정규분포와 로그정규분포 그리고 3-파라미터 Weibull분포는 전 과정에서 비슷한 분포적합성을 나타내었다. 그러나 응력비 0.10의 경우는 A-D 검정 통계치가 각 확률분포 별로 편차가 나타났으며 안정적인 분포적합성을 보인 것은 3-파라미터 Weibull분포뿐이었다.

응력비 0.20인 경우는 초기 10,000사이클을 제외하고는 검정 대상 확률분포 4가지 모두에서 분포적합성을 보였으며 특징적인 것은 정규분포, 로그정규분포, Weibull분포, 그리고 3-파라미터 Weibull분포 모두가 비슷하면서도 우수한 분포적합성을 나타낸 것이다. 또한 응력비 0.30인 경우에는 전 피로균열진전과정에서 정규분포와 로그정규분포 그리고 3-파라미터 Weibull분포가 비슷하면서도 우수한 분포적합성을 나타내었다.

피로파손이 일어났을 때의 균열 데이터에 대한 A-D검정 통계치를 Fig. 3(g)에 표시하였다. 응력비 0.05와 0.20 그리고 0.30에서는 정규분포, 로그정규분포, 그리고 3-파라미터 Weibull분포가 분포적합성을 보인 반면 응력비 0.10인 경우는 3-파라미터 Weibull분포만이 안정적인 분포적합성을 보였다.

그러므로 Fig. 3(a)~(g)를 분석한 결과 평균응력 측면에서 볼 때 피로균열 데이터에 적합한 확률분포는 정규분포, 로그정규분포, 그리고 3-파라미터 Weibull분포가 적절하다고 판

단되며 그 중에서도 3-파라미터 Weibull확률분포가 가장 적절하다고 사료된다.

### 3.3 피로균열진전에 대한 평균응력 효과

Fig. 4는 응력비를 변화시키면서 균열을 진전시켰을 때 각 FCP단계에서 피로균열 데이터의 경험적 누적분포함수를 도식한 것으로서 계단형상 그래프는 피로실험에서 얻은 피로균열 데이터의 누적분포함수를 표시한 것이며 곡선형상 그래프는 실험 데이터를 3-파라미터 Weibull분포로 추정하여 얻은 분포적합선이다. 3.2절의 Fig. 3에서 여러 가지 응력비에 대하여 각 피로균열 데이터의 산포에 적합한 확률분포를 검정한 결과 정규분포, 로그정규분포, 3-파라미터 Weibull분포가 분포적합성을 보이면서 그 중에서도 3-파라미터 Weibull분포가 더 우수한 적합성을 보였기 때문에 이 확률분포로 경험적 누적분포함수를 구하여 평균응력의 효과를 고찰하였다.

Fig. 4(a)는 FCP가 10,000사이클 되었을 때의 피로균열 데이터의 경험적 누적분포함수를 도식한 것이며 각 응력비의 효과를 비교하기 위하여 응력비 변화에 따른 누적분포함수를 함께 나타내었다. 또한 각 응력비 조건에서 피로균열 산포의 평균치를 얻기 위하여 50%의 누적확률에 해당하는 백분위수를 표기하였다. 진전된 피로균열의 크기를 비교해 보면 응력비가 0.30, 0.20, 0.10, 0.05에 대하여 각각 19.460, 20.266, 20.795, 20.843mm의 평균값을 보이면서 응력비가 작아질수록, 즉 평균응력이 작을수록 진전균열이 커짐을 보였다. 그리고 응력비가 0.05와 0.10의 경우 피로균열이 비슷하게 진전되었음을 보이고 있다. 평균응력이 클수록 동일한 FCP사이클에서 균열크기가 작다는 것은 진전속도가 느리다는 것으로 판단할 수 있다. 이것은 평균응력이 클수록 하중진폭이 작으므로 균열 열림이 작아지고, 따라서 진전균열의 크기도 작아지는 것으로 사료된다.

Fig. 4(b)~(d)는 각각 15,000, 20,000사이클에 도달하였을 때의 피로균열의 경험적 누적분포함수를 도식한 것인데 FCP사이클이 10,000사이클인 Fig. 4(a)와 비슷한 양상을 보이고 있다. 즉, 평균응력이 클수록 피로균열의 크기가 작으며 산포의 폭이 더 좁게 나타났다. 산포가 좁다는 것은 동일한 피로수명에서 특정한 균열크기에 도달할 확률이 더 크다는 것을 의미한다. FCP사이클이 진행될수록 각 응력비에 대한 진전균열 크기들의 편차가 더 커졌으며 평균응력이 작을수록 피로균열이 급속진전되었다.

Fig. 4(e)는 30,000사이클에서 응력비 0.20과 0.30인 경우의 피로균열 누적분포함수를 나타내고 있는데 이것은 응력비 0.05와 0.10의 경우에는 이미 피로파손이 발생하였기

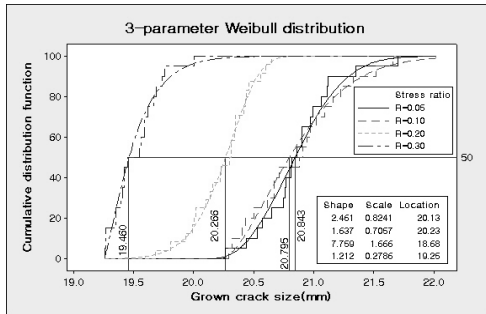
때문에 피로균열 데이터가 없음을 의미하고 있다. 또한 Fig. 4(f)는 40,000사이클에서 응력비 0.30인 경우의 누적분포함수를 보이고 있는데 다른 응력비 조건에 비해 피로수명이 가장 길다는 것을 알 수 있다. FCP사이클 25,000과 30,000, 40,000과 비교해 볼 때 응력비가 클수록, 즉 평균응력이 클수록 피로수명이 길다는 것을 확인할 수 있었다.

피로파손이 발생하였을 때의 파손균열에 대한 누적분포함수를 Fig. 4(g)에 도식하였다. 50% 누적확률의 백분위수인 피로균열크기는 응력비 0.05, 0.10, 0.20, 0.30에 대하여 각각 33.785, 33.795, 34.286, 34.919mm로 나타났으며, 응력비가 클수록, 즉 평균응력이 클수록 파손균열의 크기가 더 크며 이것은 균열진전이 더 많이 진행되다가 파손되었음을 의미한다. 누적확률 10%~90% 구간의 파손균열의 범위는 응력비 0.05, 0.10, 0.20, 0.30에 대하여 각각 32.067~35.942, 32.628~36.130, 32.738~36.001, 33.479~37.046mm였으며, 파손균열 범위의 차이 값은 평균응력 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 그러므로 피로파손 단계에서는 평균응력이 클수록 균열이 더 크게 진전되다가 파손에 이르지만, 균열의 산포는 평균응력 변화에 큰 차이를 보이지 않았고 다만 산포의 평균값만 차이를 보이는 경향이 나타났다..

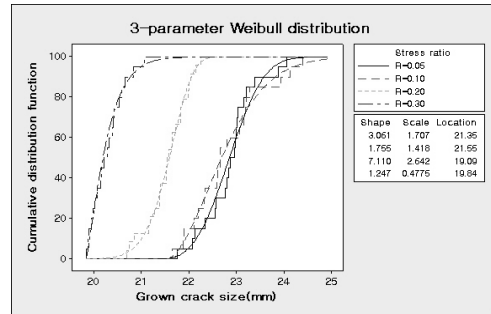
따라서 Fig. 4(a)~(g)를 분석한 결과 동일한 피로수명에서 볼 때 평균응력이 클수록 진전균열 크기가 더 작고 균열의 산포가 좁게 나타났는데, 이것은 평균응력이 클수록 하중진폭이 작으므로 균열열림이 작아지고 균열열림이 작기 때문에 진전균열의 크기도 작아지는 것으로 사료된다. 또한 평균응력이 클수록 산포가 좁은 것은 평균응력이 크면 균열열림이 작아지면서 균열이 안정적으로 성장하므로 특정수명에서의 균열 크기의 불확실성을 완화시키는 효과가 있는 것으로 판단된다.

FCP 측면에서 종합해 보면 평균응력이 클수록 피로균열이 느리게 진전하였으며, 역으로 평균응력이 작을수록 균열이 빠르게 진전되어 급속파손 되었다. 또한 FCP사이클이 진행될수록 피로균열의 산포가 점점 넓어지는 경향을 나타내었다. 이것은 평균응력이 작으면 하중진폭이 커지므로 균열열림이 커지고 동시에 균열의 진전도 커지게 되어 균열이 급속진전되는 것으로 판단된다. 그리고 FCP사이클이 진행될수록 피로균열의 산포의 폭이 넓어지는 것은 FCP사이클에 따라 균열열림이 점점 커지므로 균열선단에서의 진전거동 불안정성이 커지면서 진전균열크기의 불확실성이 커지게 되고 이로 인하여 균열의 산포가 넓어지는 것으로 사료된다.

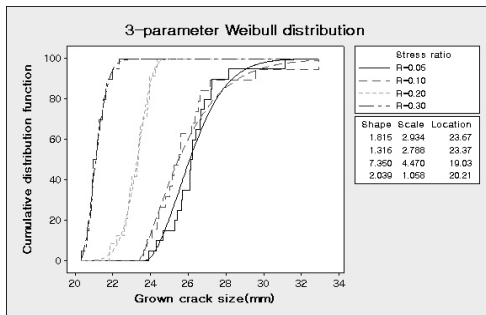
피로파손단계에서 볼 때 평균응력이 클수록 균열이 더 크게 진전하다가 파손되었으며 역으로 평균응력이 작을수록 균열이 크게 진전하지 못한 상태에서 파손에 이르는 결과들



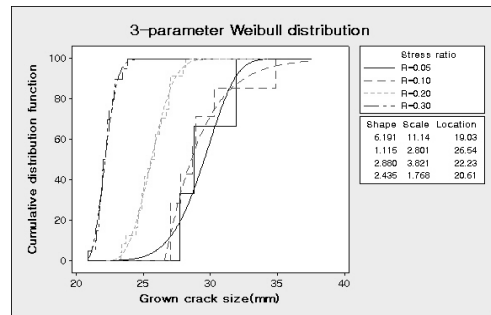
(a) FCP Life=10,000cycle



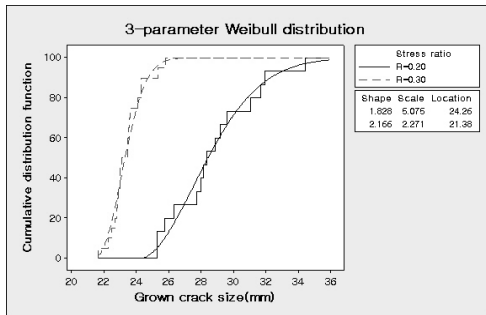
(b) FCP Life=15,000cycle



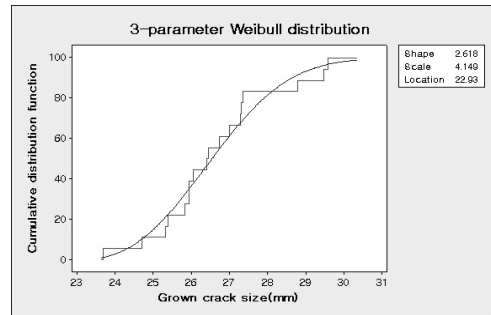
(c) FCP Life=20,000cycle



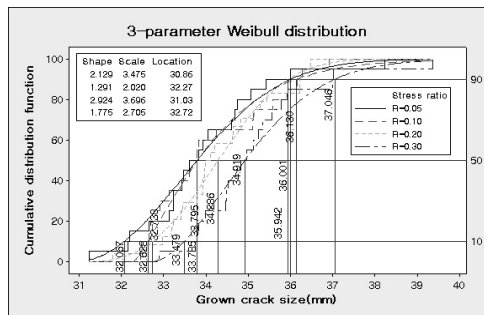
(d) FCP Life=25,000cycle



(e) FCP Life=30,000cycle



(f) FCP Life=40,000cycle



(g) FCP Life=failure

Fig. 4 Comparison of cumulative distribution function of grown crack size for various stress ratios

보였다. 평균응력이 작을수록 하중진폭이 더 크기 때문에 균열의 진전이 더 커지면서 파손도 빨라지는 급속진전, 급속파손모드 양상을 나타내었다. 파손균열의 산포는 평균응력의 변화에도 불구하고 비슷하게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 AZ31 마그네슘합금의 CT시편을 사용하여 최대하중을 일정하게 하고 응력비를 변화시키면서 일정 진폭 피로균열진전실험을 수행함으로써 각 응력비에 따른 피로균열 데이터를 확보하였으며 이 통계데이터를 이용하여 평균응력이 피로균열의 확률분포에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마그네슘합금 AZ31의 피로균열이 확률론적인 특성을 나타내었다.
- (2) 평균응력이 가장 큰 경우, 즉  $R=0.30$ 일 때 피로균열의 표준편차와 COV가 가장 작은 변동성을 보였으며, 균열이 진전될수록 평균응력의 변화에 따른 표준편차와 COV의 변동 폭이 커지는 양상을 나타내었다.
- (3) 평균응력의 변화에 따른 피로균열의 통계데이터에 대하여 Anderson-Darling 검정을 실시한 결과 3-파라미터 Weibull 분포와 로그정규분포 그리고 일부조건에서는 정규분포도 적합한 확률분포인 것으로 밝혀졌으며 그중에서도 3-파라미터 Weibull분포가 가장 적합한 것으로 확인되었다.
- (4) 특정한 FCP사이클에서 평균응력이 작을수록 균열이 빠르게 진전하는 급속진전모드 양상을 보였으며, 파손단계에서는 평균응력이 작을수록 급속파손모드양상을 나타내었다. 반면에 평균응력이 클수록 동일한 FCP사이클에서 피로균열의 산포가 좁게 나타남으로써 평균응력이 클수록 특정한 균열에 도달할 확률이 커진다는 것을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 삼육대학교 공모과제비 지원으로 수행되었으며 인하대학교 연구지원에도 함께 감사드립니다. 이 논문의 일부는 한국마린엔지니어링학회 2009년 전기 학술대회 발표논문<sup>(7)</sup>에 기초하였다.

#### 참 고 문 헌

(1) Tokaji, K., Nakajima, M., and Uematsu, Y., 2009,

“Fatigue crack propagation and fracture mechanisms of wrought magnesium alloys in different environments,” *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, Issue 7, pp. 1137~1143.

(2) Venkateswaran, P., Ganesh Sundara Raman, S., Pathak, S. D., Miyashita, Y., and Mutoh, Y., 2004, “Fatigue crack growth behaviour of a die-cast magnesium alloy AZ91D,” *Materials Letters*, Vol. 58, pp. 2525~2529.

(3) Xu, D. X., Liu, L., Xu, Y. B., and Han, E. H., 2007, “The fatigue crack propagation behavior of the forged Mg-Zn-Y-Zr alloy,” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 431, pp. 107~111.

(4) Lee, Y. B. and Oh, B. D., 2005, “Characteristics of fatigue crack propagations with respect to the angles between rolling and tensile loading directions of steel plates,” *Transactions of KSMTE*, Vol. 14, No. 3, pp. 74~80.

(5) Choi, S. S., 2009, “Effect of specimen thickness on probability distribution of fatigue crack propagation behavior in magnesium alloy AZ31,” *Journal of the KSMTE*, Vol. 18, No. 4, pp. 395~400.

(6) Choi, S. S., 2009, “Estimation of probability distribution fit for fatigue crack propagation life of AZ31 magnesium alloy,” *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 8, pp. 707~719.

(7) Choi, S. S., 2009, “Effect of mean stress on probability distribution of fatigue crack propagation behavior in magnesium alloy AZ31,” *Proceedings of the KOSME Spring Conference 2009*, pp. 221~222.

(8) Sivapragash, M., Lakshminarayanan, P. R., and Karthikeyan, R., 2008, “Fatigue life prediction of ZE41A magnesium alloy using Weibull distribution,” *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 1549~1553.

(9) Shih, T. S., Liu, W. S., and Chen, Y. J., 2002, “Fatigue of as-extruded AZ61A magnesium alloy,” *Materials Science & Engineering(A)*, Vol. 325, pp. 152~162.

(10) ASTM, 2000, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM E647-00, ASTM International, Pennsylvania.

(11) Dodson, B., 2006, *The Weibull Analysis Handbook*, ASQ Quality Press, Wisconsin, pp. 115~117.